

PACS: 75.60.-d, 71.30.+h, 73.63.Bd, 75.30.Cr, 71.30.+h

В.Т. Довгий, А.И. Линник, В.И. Каменев, В.Ю. Таренков, С.Л. Сидоров,  
Б.М. Тодрис, В.И. Михайлов, Н.В. Давыдейко, Т.А. Линник

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
И МАГНИТНО-НЕОДНОРОДНОЕ СОСТОЯНИЕ МОНОКРИСТАЛЛА  
 $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 10 августа 2012 года

*Исследованы гистерезисные особенности поведения намагниченности и сопротивления при перемагничивании в квазистатическом (до 9 Т) и импульсном (до 14 Т) магнитных полях. Изучены также процессы релаксации намагниченности и сопротивления после воздействия магнитного поля 9 Т. Для низких температур предложен механизм перемагничивания фаз антиферромагнитной изолирующей–ферромагнитной металлической (AFM/I–FM/M) и существования высокопроводящего состояния образца после снятия намагничивающего поля. Механизм связан с медленной релаксацией неравновесной решетки, соответствующей FM-фазе (большеего объема), к равновесной AFM-решетке (меньшего объема).*

**Ключевые слова:** манганиты, намагниченность, удельное сопротивление, магнитная неоднородность, фазовые переходы, упорядочение, релаксация

## 1. Введение

Исследование редкоземельных манганитов со структурой перовскита является важным направлением физики твердого тела. Эти соединения интересны с точки зрения изучения взаимодействия между магнитными, электрическими и структурными параметрами в сильнокоррелированных системах [1–3]. Природа магнитных и электрических взаимодействий в этих материалах в настоящее время не полностью понятна и является предметом широких дискуссий. С практической точки зрения они интересны как материалы, проявляющие колоссальное магнитосопротивление (КМС). Кроме того, они являются перспективными для использования в качестве записывающих и считывающих устройств магнитной записи, высокочувствительных датчиков магнитного поля, тока, температуры и давления [3,4].

Важную роль в физике манганитов играют неоднородные состояния, проявляющиеся в виде зарядового упорядочения катионов  $\text{Mn}^{3+}$ – $\text{Mn}^{4+}$ , струк-

турных и магнитных поляронов, фазового расслоения. По данным нейтронографии, фазовое расслоение в манганитах имеет место как в микроскопическом (10–20 Å), так и в мезоскопическом (порядка 1000 Å) масштабах. Явление КМС в манганитах связывают с их магнитно-неоднородным состоянием [5–7].

Манганиты с половинным замещением демонстрируют спиновое, зарядовое и орбитальное упорядочение. Это упорядочение может быть подавлено магнитным полем как результат перехода из антиферромагнитного полупроводникового в ферромагнитное металлическое состояние [8,9].

В работе проведены исследования структурных, магнитных и транспортных свойств монокристаллов состава  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  в широкой (6–400 К) области температур, квазистатическом магнитном поле до 9 Т, импульсном магнитном поле до 14 Т. Изучены процессы релаксации намагниченности и сопротивления после воздействия магнитного поля 9 Т.

Цель работы – выяснение природы гистерезисного характера поведения полевых зависимостей сопротивления и намагниченности при низких ( $\approx 10$  К) температурах и в магнитных полях до 9 Т, установление причины существования высокопроводящего состояния образца после снятия магнитного поля.

## 2. Методика получения и исследования образцов

Монокристаллические образцы состава  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  выращены методом плавающей зоны с радиационным нагревом [10]. Параметры кристаллической решетки монокристалла и направления кристаллографических осей определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2 ( $\text{Ni } K_\alpha$ -излучение) по положению линий (600), (060), (008). Постоянные решетки составили:  $a = 5.4780 \text{ \AA}$ ,  $b = 5.4308 \text{ \AA}$ ,  $c = 7.6116 \text{ \AA}$ .

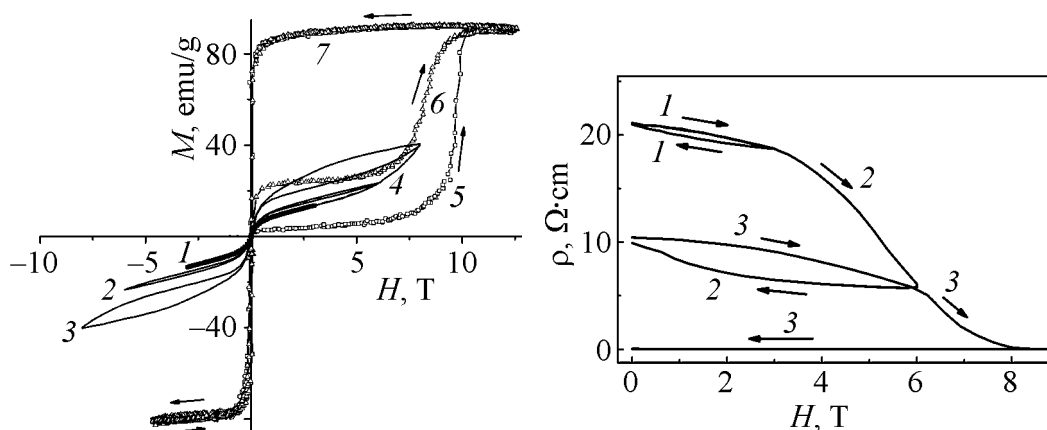
Измерение полевых и температурных зависимостей намагниченности и удельного сопротивления и исследование процесса их релаксации выполняли на установке PPMS 6000 в квазистатическом магнитном поле. В импульсном магнитном поле были исследованы зависимости  $M(H)$  в интервале температур 18–200 К с помощью индукционной методики. При этом в каждом цикле измерений на образец воздействовали двухполярным импульсом магнитного поля общей длительностью 1.5 ms. Образец с микросолеоидом и измерительными катушками находился внутри контейнера высокого давления, заполненного газообразным гелием. Для понижения температуры образца от 300 до 18 К сосуд высокого давления помещали в выносную ячейку гелиевого детандера [11].

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Монокристаллы состава  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  при охлаждении от комнатной температуры испытывают следующие преобразования: парамагнитный изолятор (PM/I)–ферромагнитный металл (FM/M) (255 К), ферромагнит-

ный металл (FM/M) (255–150 К)–антиферромагнитный изолятор (AFM/I) (< 150 К) [9].

На рис. 1 и 2 приведены полевые зависимости намагниченности  $M$  и удельного сопротивления  $\rho$  при температуре 10 К в квазистатическом поле (рис. 1 и 2, кривые 1–3) и при температуре 18 К в импульсном поле (рис. 1, кривые 5–7). Кривые намагничивания в квазистатическом поле демонстрируют сосуществование FM- и AFM-фаз. Каждый раз после установления равновесного состояния образца, соответствующего AFM/I-фазе, начальные участки кривых  $M(H)$  идут по одной и той же кривой 4 и в низких полях соответствуют намагничиванию существующей FM-фазы, а гистерезисные участки  $M(H)$  в высоких полях соответствуют перемагничиванию фаз AFM/I–FM/M. Отметим, что переход AFM/I–FM/M происходит плавно, начиная с 3–6 Т. При этом перемагничивание до 3 Т носит практически безгистерезисный характер.



**Рис. 1.** Полевые зависимости намагниченности  $M$  монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  при температуре 10 К в квазистатическом поле (кривые 1–4) и при температуре 18 К в импульсном поле (кривые 5–7). Стрелками показаны направления изменения магнитного поля. Кривые 1, 2, 3 соответствуют последовательному намагничиванию и размагничиванию образца в квазистатическом поле до 3, 6, 8(9) Т

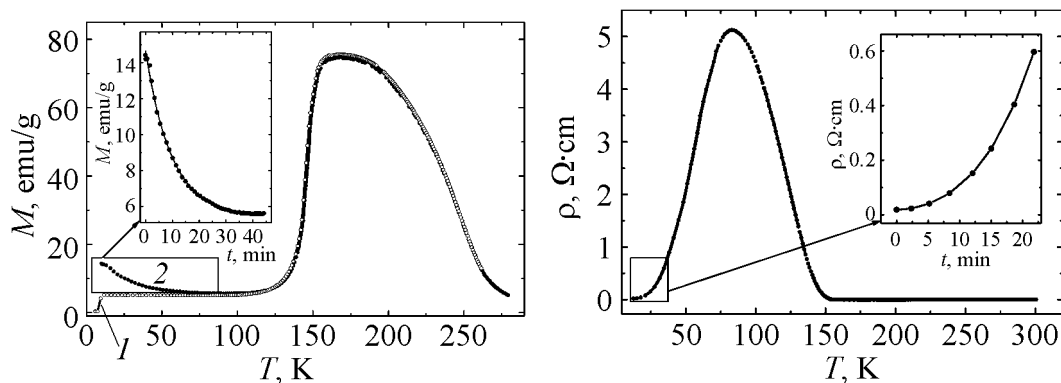
**Рис. 2.** Полевые зависимости удельного сопротивления  $\rho$  монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  при температуре 10 К в квазистатическом поле. Обозначения, как на рис. 1

Перемагничивание в импульсном и квазистатическом полях заметно отличается. Для образца, находящегося изначально в равновесном состоянии, намагничивание начинается по кривой 5, а переход AFM/I–FM/M происходит резко при величине импульсного поля порядка 10 Т. Размагничивание и перемагничивание в отрицательном поле идет по кривой 7, пока поле не обратится в нуль. Повторное перемагничивание через 3–5 min после окончания первого цикла начинается по кривой 6. При этом переход AFM/I–FM/M наблюдается при величине импульсного поля порядка 8 Т. Далее перемагничивание снова идет по кривой 7.

Полевые зависимости удельного сопротивления  $\rho$  (рис. 2) в квазистатическом поле также проявляют гистерезисный характер, демонстрируют резкое уменьшение сопротивления в магнитном поле 9 Т и сохранение этого высокопроводящего состояния после снятия магнитного поля. Отметим, что при намагничивании до 3 Т зависимость  $\rho(H)$  имеет очень слабый гистерезис и обратима (кривая 1–1). В то же время после намагничивания до 6 Т сопротивление образца заметно уменьшилось и после сброса поля не вернулось к исходному значению (кривая 2–2). Последовавший вскоре очередной цикл намагничивания до 9 Т начался от этого нового значения сопротивления, дал еще больший гистерезис и привел к упомянутому высокопроводящему состоянию (кривая 3–3). Наблюдаемое изменение удельного сопротивления на несколько порядков при воздействии магнитного поля также является специфическим КМС, аналогичным тому, которое наблюдается в районе  $T_C$ , но гораздо большей величины и происходит из-за разрушения зарядового упорядочения и магнитного фазового перехода AFM/I–FM/M. При сопоставлении зависимостей  $M(H)$  и  $\rho(H)$  обнаруживается противоречие: кривые намагниченности «замкнуты», и образец в нулевом поле размагничен, а кривые удельного сопротивления «разомкнуты» (кроме цикла 1–1), и при увеличении магнитного поля до 9 Т, а затем при его снижении до 0 низкоомное состояние сохраняется.

На рис. 3 и 4 соответственно приведены кривые температурного изменения намагниченности  $M$  и удельного сопротивления  $\rho$  после воздействия магнитного поля 8(9) Т. Нагрев образца осуществляли со скоростью  $\sim 1$  К/мин. Причем кривую  $\rho(T)$  снимали сразу после сброса поля, а кривые  $M(T)$  – сразу после сброса поля (рис. 3, кривая 2) и через 24 h (рис. 3, кривая 1). Из рис. 3 видно, что кривая 1 демонстрирует поведение, которое соответствует наличию в данном кристалле упомянутых выше фаз. При температуре ниже 10 К наблюдается «ступенька», обусловленная возникновением спонтанного магнетизма подрешетки ионов Nd. Ее магнитный момент, очевидно, направлен против магнитного момента остаточной FM-фазы, которая сосуществует в данном кристалле совместно с основной AFM-фазой до 150 К. В то же время зависимости  $M(T)$  (рис. 3, кривая 2) и  $\rho(T)$  (рис. 4) в области низких температур демонстрируют восстановление  $M$  и  $\rho$  к равновесным величинам, характерным для AFM-состояния. Постоянные времени релаксации на участках, описываемых экспонентами  $M = M_0 + M_1 e^{-t/\tau}$  и  $\rho = A_1 e^{-t/\tau}$ , составили  $\tau \approx 9.7$  min и  $\tau \approx 7$  min соответственно для намагниченности и удельного сопротивления (см. вставки на рис. 3 и 4).

По данным нейтронографических и магнитных исследований, в манганите  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  при  $T < 150$  К сосуществуют три фазы: антиферромагнитные AFM CE-типа ( $\approx 60\%$ ), AFM A-типа ( $\approx 20\%$ ) и ферромагнитная FM ( $\approx 20\%$ ) с объемом элементарной ячейки  $V_{\text{CE}} = 159.1 \text{ \AA}^3$  (моноклинная симметрия),  $V_{\text{A}} = 158.65 \text{ \AA}^3$ ,  $V_{\text{FM}} = 159.4 \text{ \AA}^3$  (орторомбическая симметрия) [12]. В то же время при  $T > 150$  К основной ( $> 80\%$ ) является FM-фаза с соответствующим наибольшим объемом элементарной ячейки.



**Рис. 3.** Температурные зависимости намагниченности  $M$  монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  (измерены в поле 0.5 Т): 1 – через 24 h после сброса поля 8 Т; 2 – сразу после сброса поля от 8 до 0.5 Т. На вставке – кривая релаксации начального участка зависимости  $M(T)$ , выделенного прямоугольником

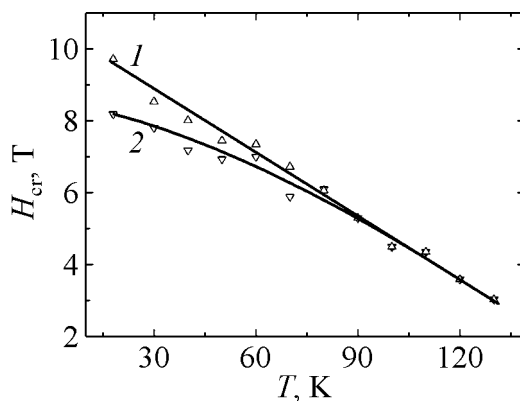
**Рис. 4.** Температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho$  монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ . На вставке – кривая релаксации начального участка зависимости  $\rho(T)$ , выделенного прямоугольником

Проведенные нами исследования показали, что при температурах порядка 10 К под воздействием магнитного поля переход AFM/I–FM/M происходит в результате перестройки кристаллической решетки монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  за счет магнитоstriction. Ясно, что такая перестройка при температурах  $\sim 10$  К не может происходить быстро. Однако в квазистатическом магнитном поле скорость его изменения, по-видимому, сравнима со скоростью трансформации решетки, и переход AFM/I–FM/M происходит плавно, что уже отмечалось при описании рис. 1.

В то же время, несомненно, в импульсном поле скорость изменения поля значительно превышает скорость преобразования решетки, и поэтому переход AFM/I–FM/M происходит, только когда величина поля достигнет уровня, при котором возможно существование лишь фазы FM/M, что подтверждается резкостью перехода (рис. 1, кривая 5). При уменьшении поля образец, какое-то время сохраняя свое новое FM/M-состояние, проявляет высокое значение FM-момента и при смене знака поля проходит через размагниченное состояние из-за образования доменной структуры. Далее, переходя в отрицательное поле, образец ведет себя как чисто ферромагнитный, проявляя то же высокое значение магнитного момента. Причем особенно это очевидно для эксперимента в импульсном поле (рис. 1, кривая 7). В квазистатическом же поле наблюдается гистерезис, связанный с тем, что образец успевает частично релаксировать к равновесному состоянию и поэтому при повторном намагничивании в положительном или отрицательном поле обнаруживает более низкое значение  $M$ . Величина гистерезиса пропорциональна величине поля, до которого намагничивается образец, что, очевидно, обусловлено тем, что с увеличением поля все большая часть фазы AFM/I переходит в состояние FM/M. Поле менее 3 Т не способно реализовать переход

AFM/I – FM/M. В этом случае намагничивается лишь остаточная FM-фаза, что происходит практически безгистерезисным путем (рис. 1, кривая 1).

Свидетельством метастабильности FM/M-состояния может служить результат, представленный на рис. 1, кривая б. Как уже отмечалось, эта кривая получена в новом цикле импульсного перемагничивания через 3–5 min после окончания предыдущего цикла. Очевидно, за это время образец успел частично релаксировать к фазе AFM/I, однако часть образца сохранила фазу FM/M с более низким значением магнитного момента, до которого образец и намагнитился при повторном перемагничивании, а в дальнейшем полный переход AFM/I–FM/M происходит при меньшем значении импульсного поля (см. резкий переход на кривой б), чем в случае, когда исходное состояние было равновесным при данной температуре.



**Рис. 5.** Температурные зависимости критического импульсного поля  $H_{cr}$  фазового перехода AFM/I–FM/M монокристалла  $Nd_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ : 1 – первый цикл перемагничивания (образец в равновесном состоянии); 2 – второй цикл перемагничивания через 3–5 min после первого

цикла. Как видно из рис. 5, при увеличении температуры от 18 до 130 К величина  $H_{cr}$  уменьшается в 3 раза. В то же время из рисунка видно, что кривые 1 и 2 сходятся при температуре  $\sim 100$  К. Этот факт может свидетельствовать только об одном: при температуре  $\sim 100$  К времени 3–5 min между циклами импульсного перемагничивания достаточно, чтобы кристаллическая решетка образца испытала полную релаксацию и перешла в равновесное состояние. Напомним, что при 10 К постоянная времени релаксации составляет до 10 min, и, следовательно, для полной релаксации могут потребоваться часы.

Таким образом, при температуре  $\sim 10$  К и намагничивании в поле 9 Т AFM-фазы SE- и A-типа испытывают переход в FM «металлическую» фазу. При этом за счет магнитострикции происходит и структурный переход с увеличением объема элементарной ячейки (учтем, что объемная магнитост-

Следует отметить, что с повышением температуры переход AFM/I–FM/M наблюдается при все более низком значении импульсного поля. На рис. 5 приведены температурные зависимости критических полей  $H_{cr}$  данного перехода, которые определены по максимуму производной  $dM/dH$  от зависимостей  $M(H)$ , аналогичных такой же зависимости, приведенной на рис. 1 для температуры 18 К. При этом кривая 1 на рис. 5 получена в первом цикле перемагничивания, когда исходно при каждой температуре образец находился в равновесном состоянии, а кривая 2 – при повторном перемагничивании через 3–5 min после окончания первого

рикция для кристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  при 10 К в 6 раз больше, чем при 150 К [13]). Поэтому после снятия намагничивающего поля 9 Т возникающая в FM-фазе доменная структура приводит образец к размагниченному состоянию ( $M = 0$ ), а релаксация увеличенной («разбухшей») решетки происходит медленно и примерно соответствует релаксации сопротивления при данной температуре.

Эксперименты по туннельной спектроскопии на  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  показывают, что щель в плотности состояний при температуре зарядового упорядочения составляет  $\sim 300$  meV. Эта щель намного больше, чем энергия зарядового упорядочения ( $\approx 12$  meV) и магнитного поля 6 Т ( $\approx 1.2$  meV) [13,14]. Поэтому непонятно, как при такой энергетической шкале поле в несколько тесла может разрушить зарядово-упорядоченное состояние. По-видимому, существование многофазности, как магнитной (наличие зародышей FM-фазы в недрах AFM-фазы), так и структурной (существование фаз с различным объемом элементарной ячейки), а также индуцирование магнитным полем за счет магнестрикции структурной перестройки с резким увеличением объема элементарной ячейки позволяют осуществить переход AFM  $\rightarrow$  FM. После снятия магнитного поля происходит медленная релаксация кристаллической структуры к равновесной, характерной для AFM-фазы. При этом существующая в районе 10 К в течение многих минут неравновесная FM-фаза и дает высокопроводящее состояние образца.

#### 4. Выводы

При намагничивании монокристалла  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  в квазистатическом поле до 9 Т и импульсном поле до 14 Т в диапазоне температур 6–140 К AFM-фазы SE- и A-типа (с высоким удельным сопротивлением) испытывают переход в FM «металлическую» фазу (с низким удельным сопротивлением). Критическое поле перехода при импульсном намагничивании уменьшается в 3 раза с ростом температуры от 18 до 130 К.

Описанный эффект обусловлен индуцированным магнитным полем (за счет магнестрикции), структурным переходом с разрушением орбитального и зарядового упорядочения и увеличением объема элементарной ячейки, характерным для FM-фазы. После снятия намагничивающего поля 9 Т при температуре 10 К магнитный момент  $M$  и удельное сопротивление  $\rho$  испытывают релаксацию к равновесным значениям, характерным для AFM-фазы с постоянными времени 9.7 и 7 min соответственно. При температурах 100–140 К полное время релаксации не превышает 5 min.

Гистерезисный характер поведения зависимостей  $M(H)$  и  $\rho(H)$  при низких температурах соответствует перемагничиванию фаз AFM/I–FM/M и обусловлен медленной релаксацией увеличенной (большого объема) кристаллической решетки, соответствующей FM-фазе, к равновесной AFM-решетке меньшего объема.

Наличие высокопроводящего состояния образца после снятия магнитного поля обусловлено существующей при температурах  $\sim 10$  К в течение многих минут неравновесной FM-фазой.

1. М.Ю. Каган, К.И. Кугель, УФН **171**, 577 (2001).
2. Ю.А. Изюмов, Ю.Н. Скрябин, УФН **171**, 121 (2001).
3. Э.Л. Нагаев, УФН **166**, 833 (1996).
4. E.L. Brosha, R. Mukundan, D.R. Brown, F.H. Garzon, J.H. Visser, M. Zanini, Z. Zhou, E.M. Logotheris, Sensors and Actuators **B69**, 171 (2000).
5. В.М. Локтев, Ю.Г. Погорелов, ФНТ **26**, 231 (2000).
6. M. Uehara, S. Mori, C.H. Chen, and S.-W. Cheong, Nature **399**, 560 (1999).
7. J.M. De Teresa, M.R. Ibarra, P.A. Algarabel, C. Ritter, C. Marquina, J. Blasco, J. Garcia, A. Del Moral, and Z. Arnold, Nature **386**, 256 (1997).
8. H. Kuwahara, Y. Tomioka, A. Asamitsu, Y. Moritomo, Y. Tokura, Science **270**, 961 (1995).
9. R. Kajimoto, H. Yoshizawa, H. Kawano, H. Kuwahara, Y. Tokura, K. Ohoyama, and M. Ohashi, Phys. Rev. **B60**, 9506 (1999).
10. A.M. Balbashov, S.G. Karasbashev, Ya.M. Mukovskii, S.A. Zverkov, J. Cryst. Growth **167**, 365 (1996).
11. А.Ф. Вуль, Б.М. Тодрис, ПТЭ № 5, 208 (1989).
12. C. Ritter, R. Mahendiran, M.R. Ibarra, L. Morellon, A. Maignan, B. Raveau, and C.N.R. Rao, Phys. Rev. **B61**, R9229 (2000).
13. R. Mahendiran, M.R. Ibarra, A. Maignan, F. Millang, A.A. Luraj, R. Mahesh, B. Raveau, and C.N.R. Rao, Phys. Rev. Lett. **82**, 2191 (1999).
14. A. Bisvas, A.K. Raychaudhuri, A. Arulraj, C.N.R. Rao, Appl. Phys. **66**, S1213 (1998).

В.Т. Довгий, А.І. Лінник, В.І. Каменєв, В.Ю. Таренков, С.Л. Сидоров, Б.М. Тодрис,  
В.І. Михайлов, Н.В. Давидейко, Т.А. Лінник

## ОСОБЛИВОСТІ МАГНІТНИХ, ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА МАГНІТНО-НЕОДНОРІДНИЙ СТАН МОНОКРИСТАЛА $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$

Досліджено гістерезисні особливості поведінки намагніченості та опору при перемагнічуванні в квазістатичному (до 9 Т) й імпульсному (до 14 Т) магнітних полях. Вивчено також процеси релаксації намагніченості й опору після дії магнітного поля 9 Т. Для низьких температур запропоновано механізм перемагнічування фаз антиферромагнітної ізолюючої–ферромагнітної металевої (AFM/I–FM/M) та існування високопровідного стану зразка після зняття поля, що намагнічує. Механізм пов'язаний з повільною релаксацією нерівноваженої ґратки, що відповідає FM-фазі (більшого об'єму), до рівноваженої AFM-ґратки (меншого об'єму).

**Ключові слова:** манганіти, намагніченість, питомий опір, магнітна неоднорідність, фазові переходи, упорядкування, релаксація



*V.T. Doygii, A.I. Linnik, V.I. Kamenev, V.Yu. Tarenkov, S.L. Sidorov, B.M. Todris, V.I. Mikhaylov, N.V. Davydeiko, T.A. Linnik*

## PECULIARITIES OF MAGNETIC, ELECTRICAL PROPERTIES AND MAGNETIC INHOMOGENEOUS STATE OF SINGLE CRYSTAL

### $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$

The hysteresis features of magnetization and resistance are investigated at remagnetizing in quasistatic (up to 9 T) and pulse (up to 14 T) magnetic field. The relaxation processes of magnetization and resistance after influence of magnetic-field of 9 T are studied too. At low temperatures, the mechanism of remagnetizing of phases (antiferromagnetic insulating phase – ferromagnetic metallic phase: AFM/I–FM/M) and the existence of the high-conducting state of the sample after removing of the magnetizing field is offered. The mechanism is related to slow relaxation of the nonequilibrium lattice corresponding to the FM-phase (greater volume) to the equilibrium AFM-lattice (smaller volume).

**Keywords:** manganites, magnetization, specific resistance, magnetic inhomogeneity, phase transition, ordering, relaxation

**Fig. 1.** Field dependences of the single crystal  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  magnetization  $M$  at the temperature of 10 K in quasistatic field (curves 1–4) and at the temperature of 18 K in pulse field (curves 5–7). Arrows show the directions of changes of the magnetic field. Curves 1, 2, 3 correspond to succeeding magnetization and demagnetization in the quasistatic field up to 3, 6, 8 (9) T

**Fig. 2.** Field dependences of the single crystal  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  specific resistance  $\rho$  in the quasistatic field at the temperature of 10 K. Arrows show the directions of changes of the magnetic field

**Fig. 3.** Temperature dependences of the single crystal  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  magnetization  $M$  (measured at the field of 0.5 T): 1 – 24 h after removing the field of 8 T; 2 – just after removing the field of 8 T down to 0.5 T. The insert shows the relaxation curve of initial section of dependence  $M(T)$  marked by the rectangle

**Fig. 4.** Temperature dependence of the single crystal  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  specific resistance  $\rho$ . The insert shows the relaxation curve of initial section of dependence  $\rho(T)$  marked by the rectangle

**Fig. 5.** Temperature dependences of the single crystal  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  critical pulse field  $H_{\text{cr}}$  of the phase transition AFM/I–FM/M: 1 – the first cycle of remagnetizing (the equilibrium state of the sample); 2 – the second cycle of remagnetizing in 3–5 min after the first cycle